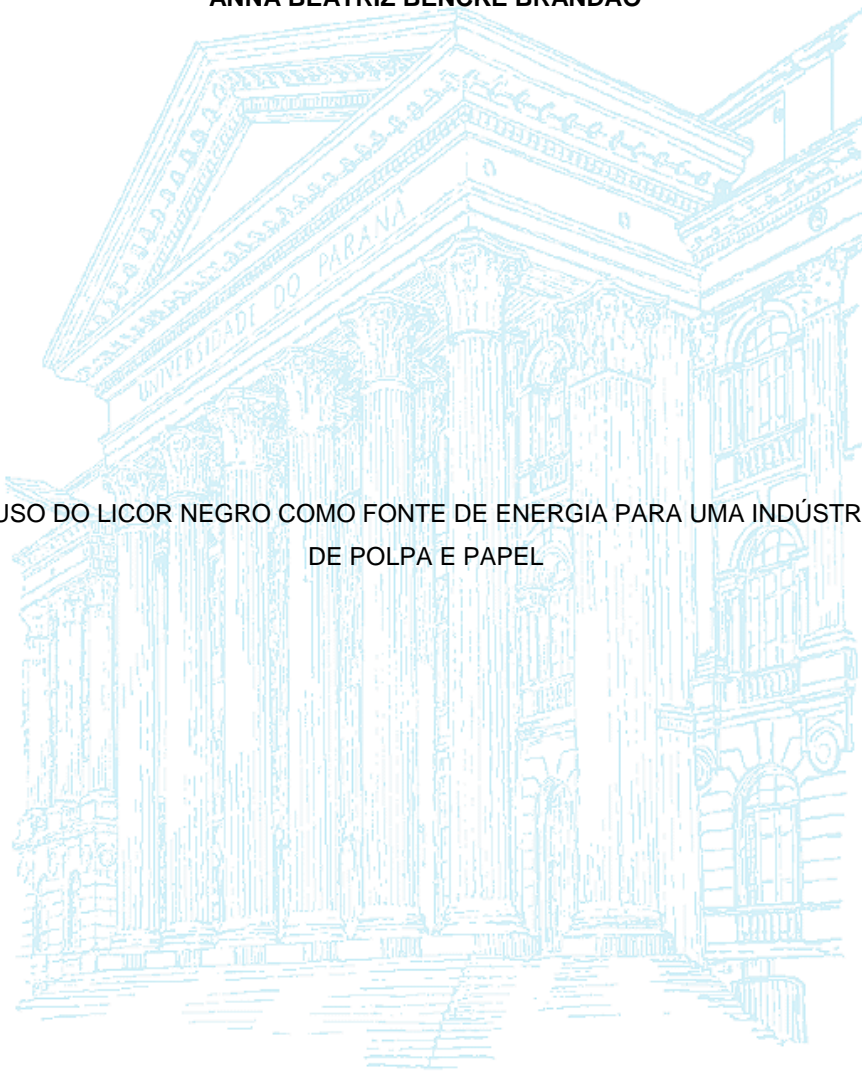


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANNA BEATRIZ BENCKE BRANDÃO

O USO DO LICOR NEGRO COMO FONTE DE ENERGIA PARA UMA INDÚSTRIA
DE POLPA E PAPEL



CURITIBA
2015

ANNA BEATRIZ BENCKE BRANDÃO

O USO DO LICOR NEGRO COMO FONTE DE ENERGIA PARA UMA INDÚSTRIA
DE POLPA E PAPEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada a
Disciplina Estágio Profissionalizante em
Engenharia Industrial Madeireira - Departamento
de Engenharia e Tecnologia Florestal do curso de
Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade
Federal do Paraná, como requisito parcial para
obtenção do título de “Engenheiro Industrial
Madeireiro.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

CURITIBA

2015

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus amados filhos: Guilherme e Fernando que ao longo destes anos de estudo tiveram paciência e, por muitas vezes, abriram mão da minha presença para que eu investisse em minha formação.

Dedico também ao meu amado marido que sempre me apoio e me cobriu nos momentos em que precisei. Por quantas vezes me ajudou e me incentivou a não desistir no meio do caminho e ir até o fim. Com certeza esta vitória só pode ser experimentada porque sempre tive você ao meu lado, muito obrigada meu amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus que me deu a capacidade para realizar este trabalho e concluir o curso. Deus reuniu circunstâncias e pessoas que cooperaram para que este trabalho fosse realizado com excelência. A Ti, Senhor, seja toda honra e toda a glória!

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho:

Prof. Dr. Dimas Agostinho pelas orientações, paciência e investimento para que este estudo fosse realizado com êxito. Obrigada professor, o senhor teve um papel fundamental para a realização e conclusão deste trabalho.

Fernando que cooperou muito me ajudando a desenvolver a parte experimental no laboratório e ao pessoal do laboratório de Energia que me ajudaram, e em especial, a Clarice que dispôs de seu tempo e paciência.

Cristiano Delgado que abriu o espaço na empresa COCELPA para a realização do estudo de caso, obrigada Cristiano por sua ajuda.

Cristiano Dreher que foi muito atencioso e disponibilizou todos os materiais para análise e todas as informações necessárias para o desenvolvimento do estudo.

Prof. Dr. Alan Sulatto que cooperou no processo inicial de definição do tema, obrigada professor por suas sugestões e apoio.

A todos os professores que cooperaram com minha formação acadêmica, sempre dedicados ao ensino e a nos dar a melhor formação possível, muito obrigada!

“Por isso não tema, pois estou com você; não tenha medo, pois sou o seu Deus. Eu o fortalecerei e o ajudarei; eu o segurarei com a minha mão direita vitoriosa”.

Isaias 41.10

RESUMO

O assunto eficiência energética tem sido cada vez mais foco de pesquisas no mundo todo onde o aumento da eficiência de um processo reduz custos e aumenta o lucro da empresa, além de gerar ganhos ambientais. No caso das indústrias de papel e celulose a atenção para a geração própria de energia é ainda maior em função dos altos custos que representam a compra de energia elétrica. O licor negro é um resíduo do processo de polpação Kraft que tem sido utilizado como insumo energético, com menor ou maior eficiência dependendo do processo utilizado. Dessa forma, o estudo para melhorar a eficiência energética do licor negro é de extrema importância, o que justifica este estudo que teve por objetivo avaliar o uso do licor negro para energia na indústria COCELPA de papel e celulose. Neste trabalho foi feita uma análise do licor e do processo produtivo e levantadas as possíveis causas que contribuíram para a baixa eficiência energética da produção de cogeração na caldeira de recuperação da indústria em contraste com os resultados da média nacional para indústrias do setor. A empresa obtém 18% de energia proveniente da caldeira de recuperação enquanto a média nacional é de 66%.

Palavras chaves: Eficiência energética, cogeração de energia.

ABSTRACT

The energy efficiency issue has increasingly been the focus of research worldwide. Increasing a process' efficiency will generate profit for the company and, in addition, environmental gains. Energy is vital to any process, nothing works without energy. When it comes to pulp and paper industry, attention to their own power generation is even greater, the costs of power purchase represents a great amount of money monthly. Financial success can be determined by achieving energy autonomy in the industrial process. Thus, the study to improve the energy efficiency of black liquor is of most importance. This study aimed to show the origin of the black liquor, assess the energy efficiency of liquor in the process that occurs in the recovery boiler, in order to raise solutions to improve the energy efficiency of the process which the black liquor is burned. The Cocelpa had low energy efficiency in the recovery boiler, about 18%. The average of Brazil's pulp and paper industry is 66%, some industries are self-sufficient in electricity and still produce surpluses that are commercialized. In this work, an analysis of the liquor and the production process conducted a survey about the possible causes that have contributed to this very low figure compared to the average.

Key words : Energy efficiency and cogeneration the energy.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESTRUTURA DO LICOR NEGRO DE ALTA VISCOSIDADE.....	16
FIGURA 2 - ESTRUTURA DO LICOR NEGRO COM BAIXA VISCOSIDADE.....	17
FIGURA 3 – PÁTIO DE MADEIRA DA COCELPA	31
FIGURA 4 – DIGESTOR DA COCELPA	32
FIGURA 5 –PROCESSO DE LAVAGEM DA POLPA	33
FIGURA 6 - PRÉ-EVAPORADOR	34
FIGURA 7 - ESQUEMA DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO	35
FIGURA 8 – SUPERAQUECEDOR E ECONOMIZADOR	37
FIGURA 9 – BALÃO SUPERIOR E SCREEN	37
FIGURA 10 – ESQUEMA DA RECUPERAÇÃO DO LICOR BRANCO.	38
FIGURA 11 - PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO.	39
FIGURA 12 - CALDEIRA DE BIOMASSA.....	39
FIGURA 13 - TURBINAS GERADORAS DE ENERGIA	41
FIGURA 14 - TURBINAS GERADORAS DE ENERGIA.....	41
FIGURA 15 - MAQUINA DE PAPEL	42

FIGURA 16 - MESA PLANA.	43
FIGURA 17 - PROCESSO DE PRENSAGEM.	43
FIGURA 18 - SECADORES.....	43
FIGURA 19 - REBOBINADEIRA.	44
FIGURA 20 - DEPÓSITO DE BOBINAS.....	45
FIGURA 21 - PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	46
FIGURA 22 - PESAGEM DO LICOR PARA DETERMINAÇÃO DO PCS.	27
FIGURA 23- PREPARAÇÃO DA AMOSTRA PARA DETERMINAÇÃO DO PCS....	28
FIGURA 24 - CADINHOS PREPARADOS PARA SEREM INSERIDOS NA MUFLA.	29
FIGURA 25 – MATRIZ NACIONAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO LICOR NEGRO	46
FIGURA 26 – GRÁFICO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO LICOR NEGRO	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS COMPOSTOS ORGÂNICOS PRESENTES NOS LICORES NEGROS PROVENIENTES DE MADEIRAS DO TIPO SOFTWOOD E HARDWOOD DA AMÉRICA DO NORTE.	18
TABELA 2 - COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA SECA DO LICOR NEGRO DO PROCESSO KRAFT DE PINUS E BÉTULA. VALORES EM % DE MATÉRIA SECA.	18
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR DE LICORES NEGROS PROVENIENTES DO PROCESSO KRAFT DE ORIGENS DISTINTAS.	19
TABELA 4 - BALANÇO ENERGÉTICO COCELPA VERSUS FIBRIA JACAREÍ	46
TABELA 5 – PERFIL DE GERAÇÃO DE ENERGIA	47
TABELA 6 - ANÁLISE QUÍMICA - RESULTADOS ANALÍTICOS DA AMOSTRA.	48
TABELA 7 - ANÁLISE QUÍMICA– ENSAIOS DE RECUPERAÇÃO.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
TABELA 8 - TEOR DE UMIDADE	49
TABELA 9 - RESULTADOS OBTIDOS DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR.....	51
TABELA 10 - RESULTADOS OBTIDOS PODER CALORÍFICO INFERIOR NA BASE UMIDA.....	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVO	14
2.1 Objetivo Geral:	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 Origem do Licor Negro	15
3.2 Composição Química do Licor Negro.....	17
3.3 Propriedades Físicas do Licor Negro	19
3.3.1 Teor de Sólidos	19
3.3.2 Viscosidade	20
3.3.3 Elevação do ponto de ebulição	20
3.3.4 Condutibilidade Térmica.....	20
3.3.5 Poder Calorífico.....	21
3.3.6 Teor de umidade	21
3.4 Caldeira de Recuperação.....	22
4 METODOLOGIA	23
4.1 Caracterização do processo produtivo.	23
4.2 Levantamento do consumo e geração de energia da indústria.	23
4.3 Caracterização do licor negro.....	24
4.3.1 Composição química do licor negro	24
4.3.2 Análise das propriedades energéticas do licor negro em laboratório.	25
4.3.3 Teor de umidade.	25
4.3.4 Poder Calorífico Superior - PSC.....	27
4.3.5. Teor de Voláteis	28
4.3.6 Teor de Cinzas	28
4.3.7 Teor de Carbono Fixo.....	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1 Caracterização do Processo produtivo.....	31
5.1.1 Pátio de madeira.	31
5.1.2 Digestor.	31
5.1.3 Lavagem da polpa.....	32

5.1.4 Processo de evaporação.....	33
5.1.5 Caldeira de recuperação.....	34
5.1.6 Precipitador eletrostático.....	38
5.1.7 Caldeira de biomassa.....	39
5.1.8 Turbinas de geração de energia elétrica.....	40
5.1.9 Máquina de papel.....	41
5.1.10 Caixa de entrada.....	42
5.1.11 Mesa plana.....	42
5.1.12 Prensagem.....	42
5.1.13 Secadores.....	43
5.1.14 Rebobinadeira.....	44
5.1.15 Expedição.....	44
5.2 PERFIL DE GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA.....	45
5.3 CARACTERIZAÇÃO DO LICOR NEGRO.....	48
5.3.1 Composição Química do Licor Negro.....	48
5.3.2 Teor de Umidade.....	49
5.3.3 Análise Química Imediata.....	50
5.3.4 Poder Calorífico.....	51
6 CONCLUSÕES.....	53
7 REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia tem sido um assunto de alta relevância nos dias atuais. O investimento em estudo de desenvolvimento de novas tecnologias que proporcionem o aumento da eficiência energética de processos proporciona retorno financeiro e contribui para o meio ambiente.

O setor de polpa e papel é um dos setores que mais cresce mundialmente. O Brasil é o maior produtor de celulose de fibra curta, o 4º maior de celulose e o 9º maior de papel. O crescimento médio anual da produção de celulose no Brasil está em torno de 7,1% e de papel 5,4%.

Este setor gera a maior parte da energia consumida em seus processos pela queima de dois combustíveis: biomassa e licor negro. Cerca de 67% da matriz energética da indústria de celulose e papel provém do licor negro (BRACELPA, 2012).

O licor negro é um subproduto do processo de cozimento Kraft, utilizado na fabricação de polpa celulósica para fabricação de papel, considerado como um subproduto problemático no aspecto ambiental. É composto por matéria orgânica e inorgânica e pelos produtos da solubilização da lignina. O licor é concentrado e posteriormente queimado na caldeira de recuperação e, desta forma, recupera-se e parte inorgânica para reaproveitar no processo e é gerada energia térmica e elétrica.

O estudo sobre o licor negro para energia tem grande relevância, visto que os gastos com energia elétrica e obtenção de vapor de uma indústria do segmento de polpa e papel são significativos. Entendendo melhor o processo, podem ser aplicadas tecnologias para melhorar o potencial energético do licor, ainda mais quando se considera que o processo de recuperação do licor negro, em boa parte das indústrias, é responsável por todo abastecimento energético da fábrica.

Neste estudo será abordado o processo de recuperação do licor negro adotado na empresa COCELPA, com avaliações de propriedades energéticas do licor produzido, permitindo sua caracterização, com o objetivo de propor uma melhora em sua eficiência energética.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL:

Avaliar o uso do licor negro para energia na COCELPA, indústria do segmento de polpa e papel situada no município de Araucária, PR.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterização do processo industrial, com destaque à origem e recuperação do licor negro.

Levantamento do consumo e geração de energia da indústria em comparação com outras do mesmo segmento.

Caracterização da composição e propriedades energéticas do licor negro utilizado no processo de cogeração de energia.

[C1] Comentário: Prof.. definir a COCELPA nos objs específicos ou não precisa?

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ORIGEM DO LICOR NEGRO

O licor negro é um subproduto oriundo do processo de polpação da indústria de polpa e papel. É formado de aproximadamente 60% de matéria orgânica e de 40% de matéria inorgânica em base seca.

A parte orgânica é formada principalmente por fragmentos de lignina juntamente com ácidos carboxílicos alifáticos, originados da reação que ocorre durante o processo de cozimento da madeira e de extrativos da madeira, no entanto, em quantidades menores (CARDOSO *et al*, 2009).

A composição inorgânica do licor negro provém do processo de cozimento da madeira com o licor branco dentro do digestor. O licor branco é composto por: hidróxido de sódio (NaOH), sulfeto de sódio (Na₂S), carbonato de sódio (Na₂CO₃), sulfato de sódio (Na₂SO₄), tio sulfato de sódio (Na₂S₂O₃) e cloreto de sódio (NaCl) (MARINS, 2012).

Tipicamente, as madeiras de coníferas diferem de folhosas por apresentarem maior conteúdo de lignina e menor conteúdo de hemicelulose. Quimicamente, a lignina da madeira de conífera é predominantemente composta por unidades de guaiacil, enquanto a de folhosas apresenta uma mistura de guaicil e de siringil. No caso das hemiceluloses, a madeira de conífera é rica em glucomanas e pobre em xilanas, sendo o comportamento oposto nas folhosas. Essas diferenças conferem propriedades distintas para o licor negro resultante de processos de polpação de madeiras de fibra longa e de fibras curtas (GUIMARÃES, 2013).

Alterações na composição do teor de lignina, carbono e extrativos provocam variações na constituição do licor negro. Isso ocorre quando é alterada a espécie utilizada para fabricação do papel, variações na idade e no sítio de onde a madeira é originada. Outros fatores intervenientes são as condições e rendimento da etapa da polpação, a composição e qualidade do licor branco e a forma como o licor é transformado de fraco a forte na etapa de evaporação.

O licor é considerado um resíduo problemático por possuir alcalinidade ativa que pode causar diversos impactos ambientais durante o controle biológico nas estações de tratamento de efluentes (SILVA, 2001)

A importância da caracterização físico-química do licor negro é a obtenção de informações sobre seus aspectos de qualidade e propriedades especiais. Estas informações poderão ser usadas para controlar o processo, auxiliar nas pesquisas e desenvolver novas tecnologias.

A FIGURA 1 apresenta a estrutura do licor negro. É possível perceber que a lignina é o agente ligante entre as fibras da madeira. Durante a operação de polpação, a lignina é fragmentada e os carboidratos são dissolvidos e convertidos em ácidos de baixa massa molar que compõem o licor negro (CARDOSO *et al.*, 2009).

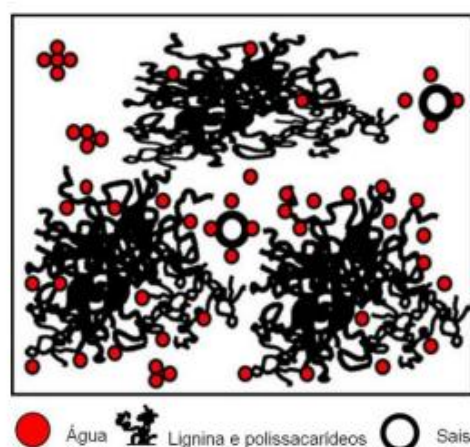


FIGURA 1 ESTRUTURA DO LICOR NEGRO DE ALTA VISCOSIDADE
Fonte: Cardoso *et al.* (2009).

A concentração, massa e estrutura molar da lignina e dos polissacarídeos presentes no licor negro afetam seu comportamento reológico. A FIGURA 1 mostra, um licor com alta viscosidade, pois possui altas concentrações de lignina e polissacarídeos. Na FIGURA 2, mostra um licor de baixa viscosidade com baixas concentrações de lignina e polissacarídeos, uma vez que estes compostos podem se aglomerar em estruturas moleculares mais compactas e esféricas (MARINS, 2012).

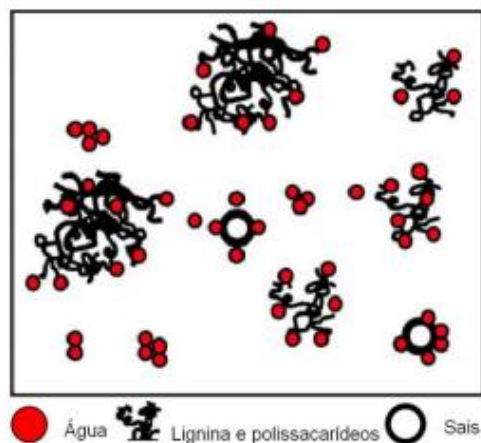


FIGURA 2 ESTRUTURA DO LICOR NEGRO COM BAIXA VISCOSIDADE
 Fonte: Cardoso *et al.* (2009).

Entender a relação entre as propriedades físicas e químicas, e o comportamento do licor negro, é fundamental para melhorar a eficiência dos ciclos de uma fábrica de papel, para o projeto de evaporadores e caldeiras de recuperação (TORNIAINEN, 2007). As propriedades físicas do licor são funções de sua composição química e determinam o comportamento do licor negro na unidade de recuperação (ADAMS *et al*, 1997).

3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LICOR NEGRO

A composição química do licor negro depende da espécie e idade da madeira, do teor de água presente, das condições e rendimento do processo de polpeamento, além da forma como o licor é transformado de fraco à forte na etapa de evaporação. A TABELA 1 apresenta a composição típica do licor negro proveniente de madeira tipo “softwood” e “hardwood”.

TABELA 1 COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS COMPOSTOS ORGÂNICOS PRESENTES NOS LICORES NEGROS PROVENIENTES DE MADEIRAS DO TIPO SOFTWOOD E HARDWOOD DA AMÉRICA DO NORTE.

Principais componentes	Softwood	Hardwood
Lignina	29%	21%
Hemicelulose	28%	34%
Celulose	43%	45%
Extrativos	10%	2-3%
Composição dos Extrativos		
Resinas ácidas	42%	-
Ácidos graxos livres	12%	19%
Gorduras	35%	55%
Substâncias não saponificáveis	11%	24%

Fonte: Frederick (citado por Adams, 1997)

A parte inorgânica do licor negro é constituída principalmente por hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), que provem do licor branco, além de carbonato de sódio (Na₂CO₃) que é formado durante a digestão e outros sais minerais naturais da madeira (STEFANOV E HOO, 2003).

A composição aproximada de compostos orgânicos e inorgânicos do licor negro de bétula e pinus do processo Kraft é mostrada na TABELA 2. Foi realizada por (Adams, 1997), uma análise elementar do licor negro produzido no Brasil e comparada com dados de licores de outros países. Observou-se que o licor negro de eucalipto, proveniente das indústrias do Brasil, possui teores mais elevados de sódio, potássio, cloro, de matéria orgânica e lignina e menor massa molar de lignina quando comparados com licores provenientes de países do hemisfério norte. Estes resultados são mostrados na TABELA 3.

TABELA 2 COMPOSIÇÃO DA MATÉRIA SECA DO LICOR NEGRO DO PROCESSO KRAFT DE PÍNUS E BÉTULA. VALORES EM % DE MATÉRIA SECA.

Componentes	Pinus	Bétula
lignina	33	27
Ácidos carboxílicos	31	32
Outros orgânicos	8	12
Inorgânicos	28	29
Sódio de orgânicos	12	12
Compostos inorgânicos	16	17

Fonte: Sixta (2006)

TABELA 3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR DE LICORES NEGROS PROVENIENTES DO PROCESSO KRAFT DE ORIGENS DISTINTAS.

Tipo de madeira processada	Localização da Indústria	Composição Elementar % em Base Seca						
		C	H	N	Na	S	Cl	Si
Eucaliptus grandis	Brasil/ Fabrica A	30,8	3,6	0,01	21,8	3,7	4,5	0,1
Eucaliptus grandis	Brasil/ Fabrica B	35,2	3,7		21,2	3	4,3	
Eucaliptus grandis	Brasil/ Fabrica C	29,6	3,6		18,7	4,4	2,6	
Eucaliptus grandis	Brasil/ Fabrica D	34,8	3,4	0,04	18,3	3,6	3,2	
Eucaliptus grandis	Brasil/ Fabrica E	32,3	3,1	0,04	23,5	4,9	2,2	
Bambosa vulgaris	Brasil/ Fabrica F	35,4	3,6	0,3	19,3	0,2	1,3	3,8
Pinus caribaea	Escandinávia	33,9	3,3	0,06	17,2	4,6	0,3	
Hardwood	Escandinávia	33,2	3,3	0,08	20,8	5,2	0,3	
Eucaliptus	América do Norte	37,3	3,6	0,09	17,3	3,4	1,6	
Palha	América do Sul	39,1	4,5	1	8,8	0,8	3,5	0,23

Fonte: Cardoso *et al*, (2009)

A análise elementar fornece resultados importantes para identificar algumas propriedades dos licores, por exemplo, licores com alto poder calorífico tendem a apresentar um alto percentual de carbono e baixos teores de oxigênio e de sódio.(Marins, 2012)

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS DO LICOR NEGRO

Algumas propriedades físicas do licor negro exercem influência direta no processo de evaporação. Estas propriedades são: teor de sólidos secos, viscosidade, elevação do ponto de ebulição, massa específica e condutividade térmica (THOMPSON, 2007).

3.3.1 Teor de Sólidos

O teor de sólidos secos é normalmente definido pela razão da massa do licor negro depois de ser seco, pela massa antes de secar por um tempo determinado e temperatura específica, normalmente 105 °C (TORNIAINEN, 2007).

A massa específica do licor negro é predominantemente influenciada pela concentração de compostos inorgânicos, além de ser uma função não linear do teor de sólidos (FRICKE. citado por Sixta, 2006):

3.3.2 Viscosidade

A viscosidade do licor negro é uma propriedade que desempenha um papel importante na operação de recuperação do processo Kraft. A viscosidade determina a potência necessária para as bombas, o coeficiente de transferência de calor nos evaporadores, a dispersão e a distribuição do tamanho das gotas do licor quando este é introduzido na caldeira (RAMAMURTHY *et al.*, 1993), além de ser um fator importante no consumo de energia da fábrica (SMALL E FRICKE, 1985).

3.3.3 Elevação do ponto de ebulição

A elevação do ponto de ebulição descreve o fenômeno em que o ponto de ebulição de um solvente será mais alto quando outro composto é adicionado, significando que uma solução tem um ponto de ebulição mais alto que um solvente puro. Isto ocorre sempre que um soluto não volátil é adicionado a um solvente (RAMAMURTHY *et al.*, 1993).

3.3.4 Condutibilidade Térmica

Condutibilidade térmica é uma propriedade térmica típica de um material homogêneo que é igual à quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma camada de espessura e de área unitárias desse material por unidade de diferença de temperatura entre as suas duas faces. Assim, a condutibilidade térmica caracteriza a maior ou menor facilidade de transferência de calor, ou seja, de

condução de calor por parte dos materiais. A capacidade de isolamento térmico é expressa no Coeficiente de Condutibilidade Térmica (CCT), habitualmente medido em $W/m^2\text{°C}$. Um coeficiente menor denota uma capacidade de isolamento térmico superior (FUTURENG, 2015).

3.3.5 Poder Calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira (JARA, 1989). No Sistema Internacional o poder calorífico é expresso em joules por grama ou quilo joules por quilo, mas pode ser expresso em calorias por grama ou quilocalorias por quilograma, segundo BRIANE & DOAT (1985). O poder calorífico é dividido em superior e inferior. O poder calorífico superior é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (BRIANE & DOAT, 1985). O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989).

3.3.6 Teor de umidade

Segundo Earl (1975), citado por CUNHA *et al.* (1989), é importante que o teor de umidade da madeira a ser usada como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manejo e o custo de transporte, agregando valor ao combustível. O conteúdo de umidade máximo que uma madeira pode ser queimada no forno está em torno de 65% a 70% base úmida. Por existir essa umidade, é inevitável que ocorra uma perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, já que a umidade da madeira evapora e absorve energia em combustão. A quantidade máxima de água que a madeira pode conter para entrar em combustão tem sido calculada em aproximadamente 65% base úmida. Desta forma, madeira com teor de

umidade acima deste limite, necessita de calor de origem externa para secar e entrar em combustão (SILVA, 2001) quanto maior o conteúdo de umidade da madeira, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia em combustão.

3.4 CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

A caldeira de recuperação tem duas funções principais na produção de celulose, a primeira é recuperar os valiosos produtos inorgânicos utilizados no processo de cozimento da madeira, e a segunda de gerar vapor por meio da queima dos constituintes orgânicos do licor negro. Essas duas funções colocam a caldeira de recuperação na categoria de um reator químico, e a torna muito complexa, tanto em relação ao projeto, como na operação. Mais complexas do que o de caldeiras de biomassa que queimam combustíveis convencionais. (HUPA, 1997).

No processo que ocorre durante a combustão na fornalha, os compostos orgânicos e inorgânicos do licor negro ainda estão intimamente misturados. Essa combustão converte a parte orgânica em compostos gasosos por meio de uma série de etapas como secagem, pirólise, gaseificação e combustão. A queima do carbono ocorre em maior proporção no leito de fundido, no fundo da fornalha. Enquanto o carbono é queimado, o material inorgânico é liberado e forma uma mistura de sais fundidos chamados de “*smelt*”, que é constituído principalmente de Na_2CO_3 , Na_2S e pequena quantidade de Na_2SO_4 (FERREIRA, 2008).

Na fornalha da caldeira de recuperação uma fração das espécies inorgânicas presente no licor negro é volatilizada. Esses elementos incluem entre outros o Na, K, S, Cl e C, que formam compostos condensáveis no gás de exaustão. De todos os compostos formados, o principal é o sulfato de sódio. Outros compostos tipicamente presentes são carbonatos e cloretos de sódio e de potássio. Nas caldeiras de recuperação Kraft, os gases produzidos no processo de combustão do licor negro trocam calor ao passarem por uma série de tubos nas áreas superiores da caldeira para produção de vapor (GUIMARÃES, 2013)

4 METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado na empresa COCELPA, fundada em 1963. Utiliza cerca de 19.250 toneladas de madeira de *Pinus taeda* e *Pinus elliot* para a produção mensal de aproximadamente de 3500 ton/mês de papel Kraft, com uma gramatura média de 100 g/m².

Para a coleta de dados foram realizadas visitas técnicas à empresa e entrevistas estruturadas junto ao corpo técnico da mesma, conforme descrito a seguir.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO.

Foram realizadas 7 visitas na indústria COCELPA, para o estudo do processo produtivo. Estas visitas foram acompanhadas pelo responsável técnico Cristiano Dreher. Que forneceu todas as informações necessárias para o estudo.

4.2 LEVANTAMENTO DO CONSUMO E GERAÇÃO DE ENERGIA DA INDÚSTRIA.

Foi realizado o levantamento do perfil de consumo e geração de energia elétrica da COCELPA através de contato presencial com a indústria e via correio eletrônico.

Foram levantadas as seguintes informações:

- Energia consumida por mês na indústria
- Geração de energia própria
- Geração de energia através do processo de recuperação do licor negro
- Geração de energia através da caldeira de recuperação
- Quantidade de energia comprada por mês

Foi levantado informações para fins comparativos do perfil de geração e consumo de energia da FIBRIA unidade Jacareí. Estas informações foram levantadas via contato por telefone e correio eletrônico. E um levantamento da média nacional de geração de energia elétrica em indústrias de polpa e papel a partir do processo de recuperação do licor negro.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO LICOR NEGRO

4.3.1 Composição química do licor negro

A análise da composição química, foram fornecidas pela COCELPA e realizada pela Bioagri Ambiental em 2009, seguindo a seguinte referência metodológica:

Ânions EPA Method 300.1 – Determination of Inorganic Anions in Drinking Water by Ion Chromatography

Metais: EPA 6010 B – Inductively Coupled Plasma (ICP) Method

Sólidos Totais: SWEWW 2540 – B Total Solids Cried at 103 – 105 °C

CNHS: ASTM D5291, D5373 E D 4239

A COCELPA forneceu as informações sobre o teor de sólidos que é quantificado através de um processo automatizado que faz o controle de hora em hora.

Foi realizado um levantamento da média nacional de geração de energia elétrica em indústrias de polpa e papel a partir do processo de recuperação do licor negro.

4.3.2 Análise das propriedades energéticas do licor negro em laboratório.

Para as análises das propriedades energéticas do licor foi utilizada a seguinte metodologia:

A coleta do licor negro foi feita na entrada da caldeira de recuperação. Foram obtidas 10 amostras coletadas de hora em hora. Este processo foi repetido por 3 vezes com intervalo de uma semana em cada coleta, totalizando 30 amostras de licor negro.

Foram feitas as seguintes análises:

- Teor de umidade segundo NBR 14929 (ABNT 2003)
- Poder calorífico superior segundo NBR 8633 (ABNT 1984)
- Análise química imediata segundo NBR 8112 (ABNT 1986)

Nas primeiras 10 amostras o poder calorífico foi quantificado com as amostras úmidas. No entanto, como o material é bastante viscoso, muitas amostras não ativavam a ignição, fazendo com que fosse perdido muito material de análise, dessa forma nas demais amostras foi realizado o PCS (poder calorífico superior), com a amostra seca.

Para a adaptação metodológica foram utilizados recipientes de polipropileno, uma vez que os recipientes de vidro foram inviáveis para as análises em função da viscosidade do material. As análises do licor foram realizadas em triplicata.

4.3.3 Teor de umidade.

Em cada recipiente de polipropileno, previamente tarado, foram colocados aproximadamente 50g de licor negro e novamente foram pesados, incluindo a amostra úmida. Os recipientes foram então colocados na estufa a 90°C por 24h e depois pesados com a amostra seca. Ilustrados nas FIGURAS 21. O teor de umidade foi obtido pela diferença entre os pesos da amostra, antes e logo após ser submetida à secagem, por meio da equação 1.

$$Tu = \frac{m1 - m2}{m1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Tu = Teor de umidade da biomassa, em porcentagem (%);

m1 = Massa inicial da biomassa gramas (g);

m2 = Massa final da biomassa, em g.



A - AMOSTRAS DE LICOR EM ANÁLISE



B - AMOSTRAS NA ESTUFA.



C - REMOÇÃO DAS AMOSTRAS.



D - AMOSTRAS NO DESSECADOR

FIGURA 21 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

4.3.4 Poder Calorífico Superior - PCS

Para a determinação do PCS foi seguida a norma NBR 8633 (ABNT 1984). Foi pesado na balança analítica, aproximadamente 0,4g de licor já inseridos no cadinho e depositados no calorimétrico IKA C500 demonstrado na FIGURA – 22 para determinação do PCS. Conforme FIGURA 23.

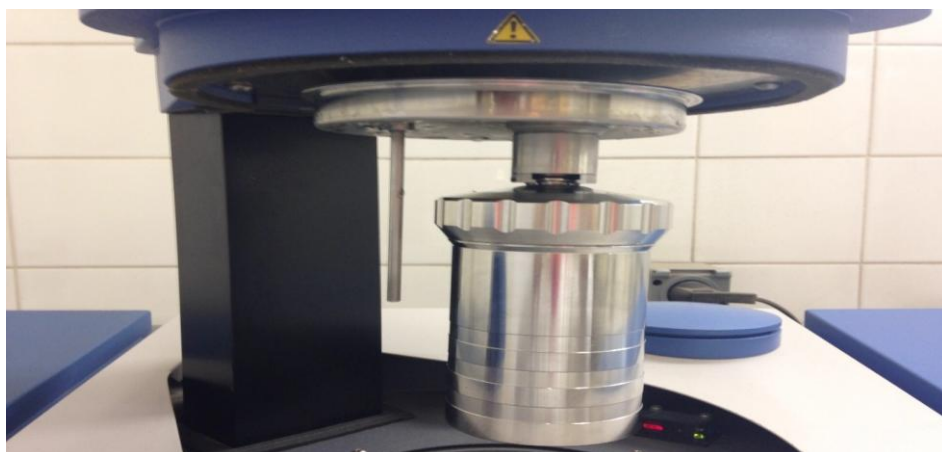


FIGURA 22 – CALORIMETRO IKA C500.



FIGURA 23- PREPARAÇÃO DA AMOSTRA PARA DETERMINAÇÃO DO PCS

Análise química imediata (AQI).

Para a AQI, foi seguida a norma NBR8112 (ABNT 1986). Foram pesados 30 cadinhos incinerados, para fazer triplicata de cada amostra, depois pesado novamente cada cadinho juntamente com 3g de licor negro seco.

4.3.5. Teor de Voláteis

Obtida a amostra seca, "*in natura*". As amostras dispostas em cadinho de porcelana foi colocada em Forno Mufla, aquecido até 850° C por 7 (sete) minutos, seguindo a metodologia da Norma NBR 8112 (ABNT 1986). Após este procedimento, a amostra foi colocada em um dessecador para resfriamento e pesagem. Após a extração dos voláteis, fica como resíduo o carbono fixo e as cinzas (Figura 27). O teor de voláteis é determinado pela equação 2:

$$Tv = \frac{m2 - m3}{m2} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Tv: Teor de voláteis, em %;

m2: Massa final do teor de umidade, medida em g.;

m3: Massa final proveniente da mufla, em g.

4.3.6 Teor de Cinzas

Para determinação das cinzas, foi colocado as amostras de licor por 7 horas a 700°C dentro da mufla. Ilustrado na FIGURA 24. Ao termino, dentro do cadinho restam somente cinzas resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos. O teor de cinzas é calculado pela equação 3 a seguir:

$$T_{cinzas} = \frac{m_3 - m_4}{m_3} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Tcinzas: Teor de cinzas, em %;

m3: Massa da amostra antes do experimento, em g;

m4: Massa da amostra após o experimento, em g.



FIGURA 24 - CADINHOS PREPARADOS PARA SEREM INSERIDOS NA MUFLA.

4.3.7 Teor de Carbono Fixo

Após a determinação dos teores de umidade, de material volátil e de cinzas da amostra, o teor de carbono fixo é determinado indiretamente pela

diferença entre os valores do teor de voláteis e teor de cinzas, através da equação 4 a seguir:

$$T_{cf} = 100 - (T_v + T_{cinzas}) \quad (4)$$

Onde:

T_{cf}: Teor de carbono fixo, em %;

T_v: Teor de voláteis, em %;

T_{cinzas}: Teor de cinzas, em %.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO.

5.1.1 Pátio de madeira.

Para o processo de produção, as toras de pinus chegam no pátio de madeira onde passam pelo descascador, picador e são classificadas e estocadas, basicamente com o objetivo de transformar as toras em cavacos e com a menor perda de massa possível. Como ilustrado na FIGURA 3.



FIGURA 3 – PÁTIO DE MADEIRA DA COCELPA
Fonte: COCELPA (2015)

4.1.2 Digestor.

Os cavacos são inseridos dentro do digestor contínuo FIGURA 4, juntamente com o licor branco, que é a mistura de dois reagentes químicos hidróxido

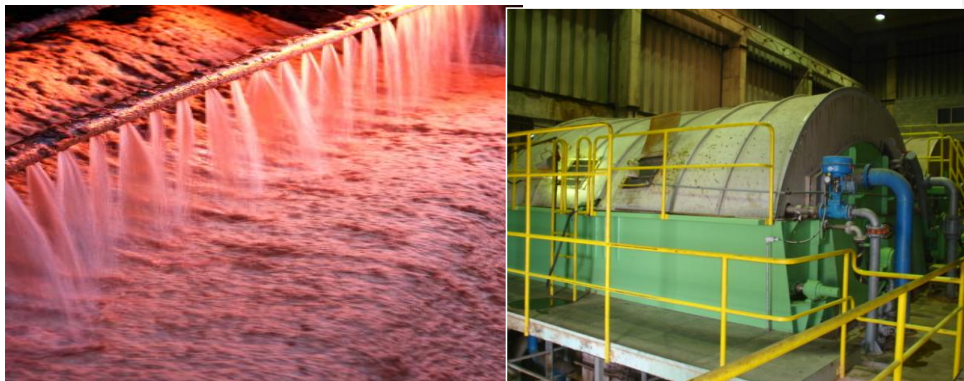
de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na_2S). Para proceder o cozimento da madeira visando a obtenção da polpa celulósica, então aplica-se certa uma pressão a uma temperatura entre (115° e 120°C) por cerca de 2 horas. Este cozimento tem o objetivo de separar a celulose contida na madeira, que é chamada de polpa celulósica. Neste processo é gerado o licor negro.



FIGURA 4 – DIGESTOR DA COCELPA
Fonte: COCELPA (2015)

5.1.3 Lavagem da polpa.

A polpa celulósica passa por um processo de lavagem, com o objetivo de efetuar a limpeza para a recuperação do licor negro. Como está na FIGURA 5.



A – LAVAGEM DA POLPA

B – EQUIPAMENTO DE LAVAGEM DE POLPA

FIGURA 5 –PROCESSO DE LAVAGEM DA POLPA

FONTE: Cocelpa, 2015

5.1.4 Processo de evaporação.

A “água” proveniente do processo de lavagem e, juntamente com o licor negro retirado do digestor, vão para o processo de evaporação. Primeiro passa por uma pré-evaporação, em um equipamento chamado “ Coluna Lockman Voith”, onde na entrada o teor de sólidos é de 13,77 %, com o aumento deste na saída para 27,5 %, com uma capacidade de evaporação de água de 40 ton/h. O licor então passa pelo processo de evaporação, no equipamento Múltiplo Efeito Voith (4 Efeitos), que trabalha em contracorrente, na saída, o teor de sólidos é de 51,5% com uma capacidade de evaporação de água de 35 ton/h (FIGURA 6).



FIGURA 6 - PRÉ-EVAPORADOR DO LICOR NEGRO
Fonte: COCELPA (2015)

5.1.5 Caldeira de recuperação.

Nesta etapa o licor negro entra na caldeira de recuperação onde a parte orgânica é queimada gerando vapor superaquecido, que por sua vez passando por conjunto turbo gerador gera energia térmica e elétrica simultaneamente, processo de cogeração de energia.

A Caldeira de Recuperação que a COCELPA trabalha é da Marca/Modelo: Gotaverken, tem uma produção de vapor: 29,5 ton/hora e queima de sólidos de 210 ton/dia. Utiliza como combustível na caldeira o licor negro concentrado proveniente da evaporação, alimentado na fornalha por um bico aspersor.

A caldeira de recuperação do licor negro possui duas regiões importantes:

- Fornalha ou zona de combustão do licor
- Parte superior da caldeira, região dos acessórios, (superaquecedores, balões e economizadores)

A FIGURA 7 mostra um esquema representativo da caldeira de recuperação utilizada pela empresa, ilustrando as principais regiões.

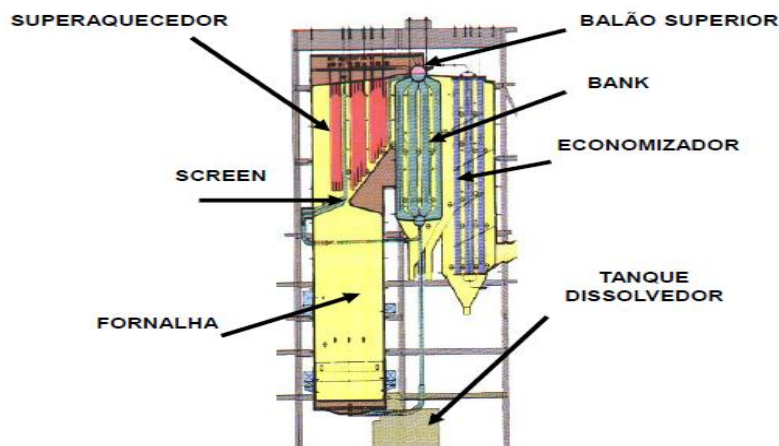
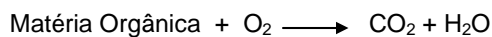


FIGURA 7 - ESQUEMA DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO
Fonte: COCELPA (2015)

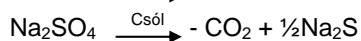
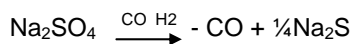
A caldeira de recuperação funciona como um reator químico para a recuperação dos inorgânicos e na combustão do orgânico (licor negro), gera vapor superaquecido para o processo que é utilizado na geração de energia térmica e elétrica, além de destruir as substâncias orgânicas dissolvidas e deste modo elimina as descargas para o meio ambiente.

As principais reações que ocorrem na caldeira são:

- Combustão da Matéria Orgânica



- Redução do Enxofre Presente no Licor



Os principais constituintes da caldeira são:

- Evaporador Cascata: Tem como objetivo aumentar a concentração do licor de 50% para 62% utilizando os gases provenientes da Caldeira de Recuperação. É um concentrador de contato direto.
- Tanque de Mistura: Local onde acontece a mistura do Licor Negro Forte com o Sulfato de Sódio para suprir as perdas de reagentes do processo; as cinzas provenientes do precipitador eletrostático e da própria caldeira para recuperação dos químicos contidos nela e com o vapor para controle da temperatura do licor.
- Uma caldeira de recuperação é constituída basicamente por:
 - Fornalha;
 - Superaquecedor;
 - Economizador;
 - *Screen*;
 - Balão Superior;
- Fornalha:
 - Parte Inferior da caldeira, local onde o ar e o Licor Negro são alimentados e toda reação química se processa;
 - Possui entrada para ar, licor e óleo, bem como saída (inferior) para os químicos fundidos *smelt*.
- Economizador
 - Aproveita o calor remanescente no gás de saída para aquecer a água de alimentação. Ilustrado na FIGURA 8.
- Superaquecedor
 - Troca a maior quantidade de calor com os gases, a fim de superaquecer o vapor saturado proveniente do balão superior ilustrado na FIGURA 8.

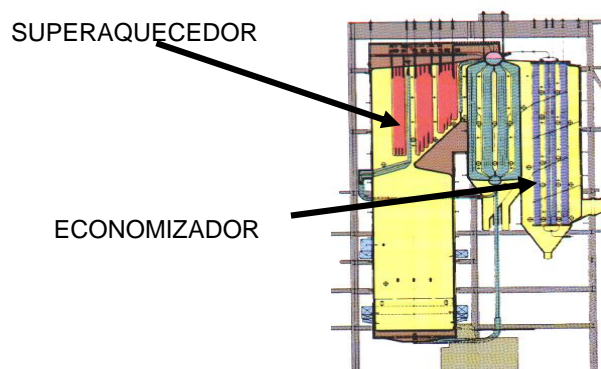


FIGURA 8 – SUPERAQUECEDOR E ECONOMIZADOR
Fonte: Cocelpa, 2015

- Screen
 - Tubulação situada entre a fornalha e o superaquecedor, com a finalidade de proteger o superaquecedor dos gases quentes da fornalha (FIGURA 9).
- Balão Superior
 - Local onde acontece a separação da água e vapor saturado. Ilustrado na FIGURA 9.

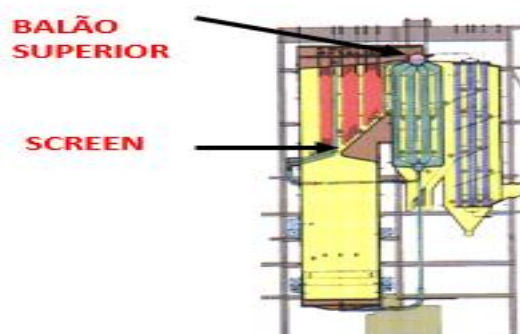


FIGURA 9 – BALÃO SUPERIOR E SCREEN
Fonte: COCELPA (2015)

Recuperação dos inorgânicos

Outro produto gerado no processo da caldeira de recuperação é o “SMELT” uma pasta inorgânica de carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sulfeto de sódio, que vai para um tanque de dissolução, onde é dissolvido para formar o licor verde, que por sua vez reage com óxido de cálcio (CaO), cal virgem, para converter Na_2CO_3 em NaOH e regenerar o licor branco original. Que por sua vez retorna para o processo de cozimento no digestor fechando o ciclo de recuperação dos inorgânicos. Esquema apresentado na FIGURA 10.

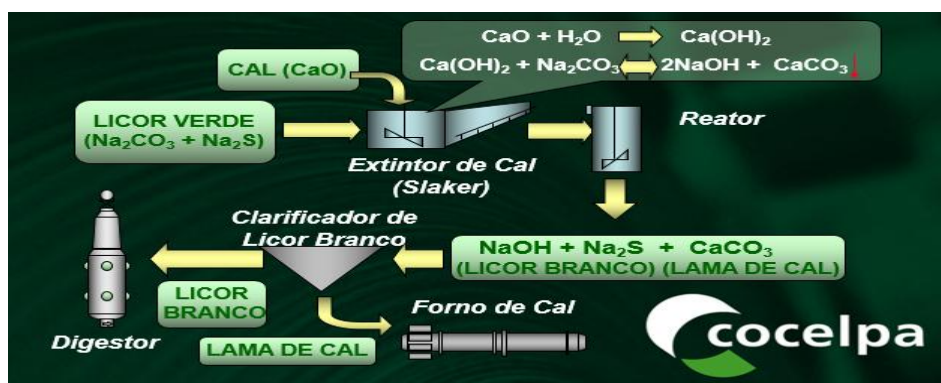


FIGURA 10 – ESQUEMA DA RECUPERAÇÃO DO LICOR BRANCO.

Fonte: Cocelpa, 2015

5.1.6 Precipitador eletrostático.

O vapor gerado na caldeira é composto por muitos particulados, por esta razão passa por um precipitador eletrostático, que tem o objetivo de remover as partículas dos gases, recuperando assim o sulfato de sódio que é arrastado e gerando um gás com menor quantidade de particulados. Ilustrado na FIGURA 11.



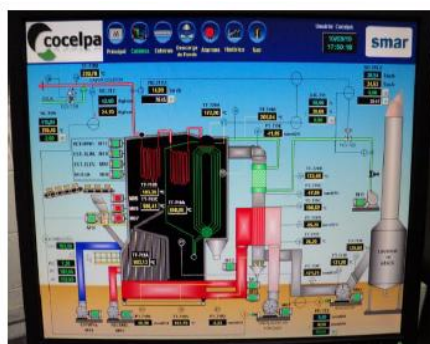
FIGURA 11 - PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO.
Fonte: COCELPA (2015)

5.1.7 Caldeira de biomassa

A COCELPA consome por mês cerca de 6.840 MW. Desta demanda de energia da fábrica 4.680 MW provem de geração própria e o restante é comprado da Copel. A caldeira de biomassa é responsável por 73% da demanda de energia, gerando 3416 MW por mês. Ilustrado na FIGURA 12.



A Caldeira de Recuperação



B Painel de controle

FIGURA 12 - CALDEIRA DE BIOMASSA DA MARCA/MODELO: EQUIPALCOOL PRESSÃO MÁXIMA: 52 KGF / CM² PRODUÇÃO DE VAPOR: 65 TON / HORA. ILUSTRADA NAS FIGURAS J.
Fonte: Cocelpa, 2015

A caldeira de recuperação é responsável por 27% da energia gerada, ela gera 1264 MWh de energia elétrica por mês. Que equivale a 18,5% do consumo total e energia elétrica na fábrica.

5.1.8 Turbinas de geração de energia elétrica.

A fábrica trabalha com duas turbinas de geração de energias, a primeira é de contrapressão que tem uma entrada de 45 kgf/cm² e duas saídas: uma de 12 kgf/cm² que vai para o digestor para cozinhar o cavaco e outra saída de 5 kgf/cm² que vai para a máquina de papel e para evaporação. A diferença de entrada e saída de pressão vai gerar energia elétrica.

Existe outra turbina que é de extração, onde o vapor entra com 45 kgf/cm² e é consumido toda a energia, esta turbina possui maior rendimento, o vapor que entra é totalmente condensado, voltando para o processo de evaporação. Esta energia gerada pela turbina de extração, adicionada a energia comprada pela Copel, representa toda a energia consumida pela fábrica. Ilustrado nas FIGURAS 13 e 14.

A fábrica gasta cerca e R\$ 1.800.000,00 por mês com energia comprada pela Copel.

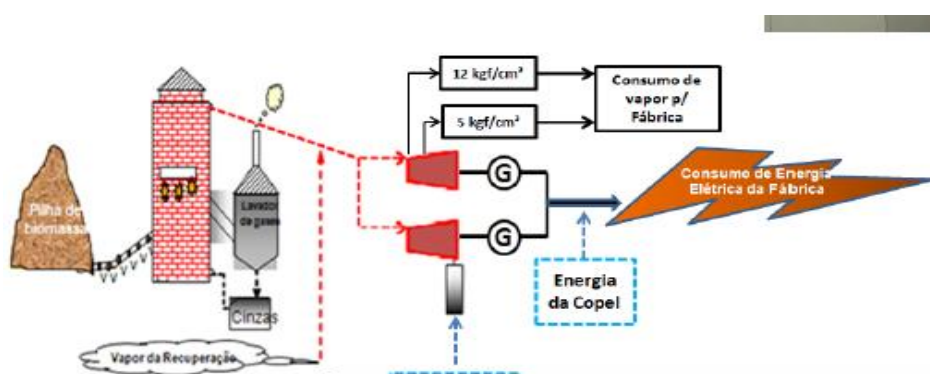


FIGURA 13 – ILUSTRAÇÃO DA PRODUÇÃO E USO DE ENERGIA NA INDÚSTRIA.
FONTE: COCELPA, 2015



FIGURA 14 - TURBINAS GERADORAS DE ENERGIA.
FONTE: COCELPA, 2015

5.1.9 Máquina de papel.

A pasta que sai do digestor passa por um processo de refinação que consiste em submeter as fibras de celulose a uma ação de esmagamento e fibrilação entre os discos do refinador. O grau de refinação (maior ou menor) varia em função das características do papel que se pretende fabricar (FIGURA 15). A refinação em alta consistência aumenta a resistência do papel.



FIGURA 15 - MÁQUINA DE PAPEL MARCA/MODELO: VOITH LARGURA MÁXIMA DO PAPEL: 4,5 METROS VELOCIDADE : 400 M/MIN PRODUÇÃO : 170 TON/DIA. ILUSTRADA NA FIGURA 14.
FONTE: COCELPA, 2015

5.1.10 Caixa de entrada.

Após a polpa celulósica sair do digestor, a mesma passa pela caixa de entrada que tem a função de distribuir a suspensão de fibras sobre a tela formadora o mais uniformemente possível.

5.1.11 Mesa plana.

No segmento do processo, a polpa vai para a mesa plana onde ao caírem sobre a tela, as fibras se acomodam formando o papel na superfície da tela. Conforme a FIGURA 16.



FIGURA 16 - MESA PLANA PARA FABRICAÇÃO DE PAPEL.
FONTE: COCELPA, 2015

5.1.12 Prensagem.

A polpa já acomodada na esteira passa pelo processo de prensagem, que no ponto de encontro entre os dois rolos é feita a prensagem do papel e feltro. A água contida no papel é transferida para o feltro. Ilustrado na FIGURA 17.



FIGURA 17 - PROCESSO DE PRENSAGEM DA PASTA PARA OBTENÇÃO DE PAPEL.
FONTE: COCELPA, 2015

5.1.13 Secadores.

O papel segue para o processo de secagem, cujo equipamento é composto de inúmeros cilindros secadores. Conforme FIGURA 18.



FIGURA 18 – SECADORES DE PAPEL.
FONTE: COCELPA, 2015

5.1.14 Rebobinadeira.

Após a secagem o papel segue para a rebobinadeira que atende às especificações de largura e diâmetro solicitadas pelos clientes da empresa. Conforme ilustrado na FIGURA 19.



FIGURA 19 – REBOBINADEIRA DE PAPEL.
FONTE: COCELPA, 2015

5.1.15 Expedição

Por fim o papel passa pelo controle de qualidade em laboratório, para controle de processo e qualidade do papel, e pelo scanner para controle de gramatura e umidade do papel, seguindo para a armazenagem e carregamento do papel em bobinas, com a capacidade de armazenamento de 1.400 toneladas. Conforme FIGURA 20.



A – DEPÓSITO DE BOBINAS



B – ARMAZENAMENTO DAS BOBINAS

FIGURA 20 - DEPÓSITO DE BOBINAS.
FONTE: COCELPA, 2015

Os produtos produzidos pela Cocelpa são:

- Kraft Natural Extensível - papel com alta resistência para sacos valvulados. Cimentos, cal, sementes, rações.
- Kraft Natural - papel natural para sacos Boca Aberta e Sacolas. Indústrias alimentícias.
- Kraft Liner Board - papel especial para caixas de papel.
- Kraft Semi Extensível – papel com alta performance de conversão.
- Kraft Semi Extensível Wet Strength – papel com resistência a úmido.

5.2 PERFIL DE GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA

O perfil do balanço energético relativo ao consumo na COCELPA é apresentado na Tabela 4.

TABELA 4 - BALANÇO ENERGÉTICO COCELPA VERSUS FIBRIA JACAREÍ

	COCELPA	FIBRIA *
ENERGIA CONSUMIDA MW/MÊS	6,84	100
GERAÇÃO DE ENERGIA MW/MÊS	4,68	98
CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO MW/MÊS	1,264	75
CALDEIRA DE BIOMASSA MW/MÊS	3,416	23
ENERGIA COMPRADA MW/MÊS	2,16	2

*Dados fornecidos pela FIBRIA via e-mail para fins comparativos.

Os dados mostram que a COCELPA tem uma maior dependência na aquisição de energia elétrica junto a concessionária Copel, de 31,5% do total consumido, em comparação com a empresa FIBRIA que compra somente 2% do total da demanda. Esta constatação mostra que a empresa analisada tem a necessidade e a possibilidade de evolução na auto geração de energia.

Do total da energia gerada pela COCELPA, o que provém do processo de recuperação do licor negro representa 27% enquanto a unidade da FIBRIA, de Jacareí, gera 77% de energia elétrica com o processo de recuperação.

Outro dado importante levantado é que a COCELPA trabalha com 62% de teor de sólidos e a FIBRIA trabalha com 75% de teor de sólidos, o que aumenta a capacidade energética do licor.

A FIGURA 25 mostra a evolução da matriz energética no setor de polpa e papel no período de 1970 a 2012. A principal e crescente fonte desta matriz é o licor negro que responde em cerca de 70% da matriz. Essa matriz no caso particular da empresa estudada é de 18,5%, assim há a necessidade de evolução na empresa para equiparação a média nacional, conforme mostrado na Tabela 5.

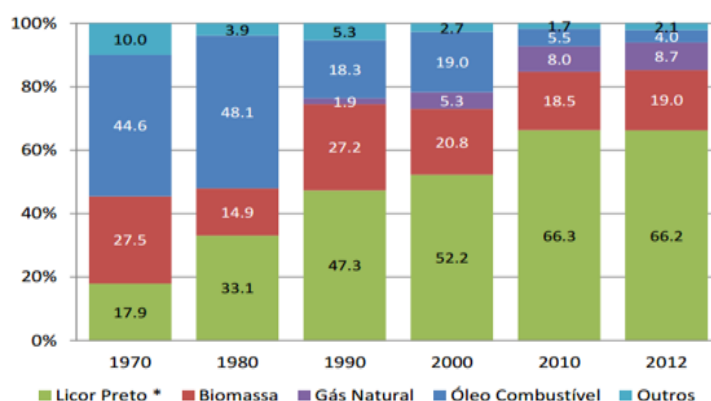


FIGURA 25 – EVOLUÇÃO DA MATRIZ NACIONAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO LICOR NEGRO EM FÁBRICAS DO SETOR DE CELULOSE E PAPEL.

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2015

TABELA 5 – PERFIL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

	COCELPA	FIBRIA	MÉDIA NACIONAL
GERAÇÃO DE ENERGIA MW/MÊS	68,42%	98%	85,20%
CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO MW/MÊS	18,48%	75%	66,20%
CALDEIRA DE BIOMASSA MW/MÊS	49,94%	23%	19%
ENERGIA COMPRADA MW/MÊS	31,58%	2%	14,80%

Do total de energia que a COCELPA demanda 18,5% da energia elétrica provém do processo de recuperação do licor negro. A média nacional que as indústrias de polpa e papel geram, registrada pela (MME, 2014) é de 66,2%. A unidade da FIBRIA de Jacareí gera 75% de energia elétrica a partir do processo de recuperação do licor negro.

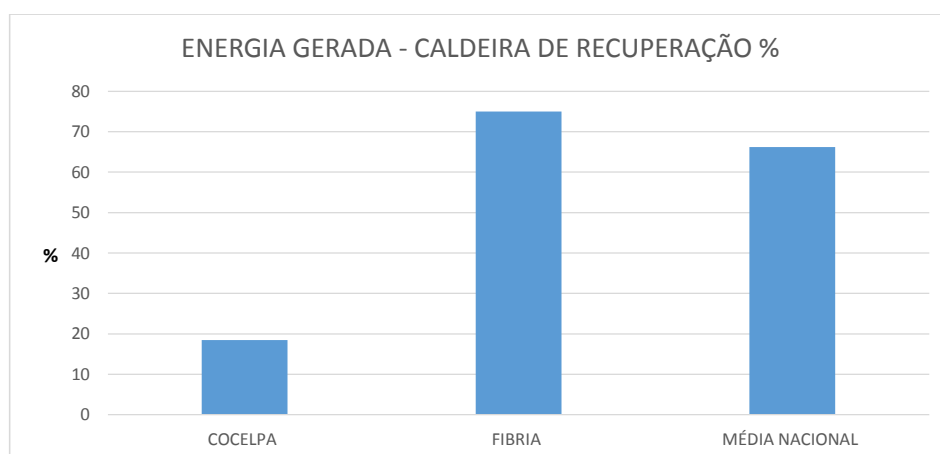


FIGURA 26 – GRÁFICO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO LICOR NEGRO

Algumas indústrias como: a INTERNACIONAL PAPER, a SUZANO, unidade Três Lagoas da FIBRIA e a CELULOSE RIO GRANDENSE, já são autossuficientes em energia e produzem excedentes que são comercializados, a partir do processo de recuperação do licor negro (SCUCUGLIA, 2008).

A COCELPA apresentou um baixo percentual de energia gerada a partir da caldeira de recuperação quando comparado com a média nacional e outras indústrias do mesmo segmento. Um dos prováveis aspectos que contribuem para este número é o teor de sólidos que, segundo um estudo feito por Scucuglia (2008), ao aumentar o teor de sólidos de 75% para 85% foi possível o aumento na geração de energia elétrica de 3MW/mês. Isso ocorre, pois, um maior teor de sólidos no licor

negro aumenta a eficiência da caldeira, reduzindo a perda através dos gases expelidos na atmosfera e o calor requerido para evaporar a água do licor negro é menor.

Outro provável aspecto da ineficiência energética da empresa se deve à obsolescência da planta industrial da COCELPA, sendo muito antiga (1975), mesmo tendo sido feitas melhorias nos equipamentos.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DO LICOR NEGRO

Através dos resultados obtidos das análises em laboratório foi permitido o estudo da influência de algumas propriedades físicas sobre o comportamento do licor negro para fins energéticos. Foi possível também a comparação entre os resultados obtidos em laboratório, com os encontrados na literatura.

5.3.1 Composição Química do Licor Negro

A Tabela 6 apresenta a composição química do licor negro, com detalhe para a composição elementar e teor de sólidos.

TABELA 6 COMPOSIÇÃO QUÍMICA MÉDIA DO LICOR NEGRO.

Parâmetros	Unidade	Resultados Analíticos
Teor de Sólidos	%pp	65,7
Carbono	%pp	24
Hidrogênio	%pp	6,2
Enxofre	%pp	2
Sódio	mg/kg	186248
Potássio	mg/kg	8756
Cloreto	mg/kg	585

Fonte: Fornecido por COCELPA 2015

O teor de carbono encontrado nas amostras de licor da COCELPA de 24% está abaixo do valor encontrado na literatura, conforme citado por Cardoso *et al.*

(2006) que foi de 33.9%. O percentual de carbono está intimamente ligado ao poder calorífico. Este valor possivelmente contribui para o valor mais elevado encontrado na literatura do poder calorífico quando comparado com os valores encontrados em laboratório (FOCKEL, 2015).

A parte inorgânica encontrada por Sixta (2003) foi de 28% para licor negro proveniente de *Pinus*, enquanto que o teor de inorgânicos da COCELPA fica em torno de 38%. Este valor influenciará diretamente no teor de cinzas, que por sua vez influencia no poder calorífico medido. Quanto maior a fração inorgânica maior será o teor de cinzas e menor o poder calorífico.

5.3.2 Teor de Umidade

Os resultados do Teor de umidade do licor negro estão registrados na tabela 7.

TABELA 7 - TEOR DE UMIDADE

AMOSTRA	UMIDADE BASE ÚMIDA			UMIDADE BASE SECA		
	MÉDIA	DESVIO	CV	MÉDIA	DESVIO	CV
1	34,13	1,36	4,00	51,87	3,11	5,99
2	35,97	0,06	0,17	56,17	0,15	0,26
3	36,80	0,65	1,76	56,39	1,59	2,83
4	32,04	0,52	1,63	47,16	1,14	2,41
5	26,09	2,54	9,72	35,41	4,71	13,31
6	30,41	2,23	7,32	43,79	4,52	10,33
7	37,89	1,06	2,80	61,04	2,77	4,53
8	36,43	0,25	0,68	57,32	0,61	1,07
9	37,73	0,52	1,38	60,60	1,35	2,22
10	36,45	0,76	2,09	57,37	1,89	3,29
MÉDIA	34,13	0,99		52,71	2,18	

Os resultados mostram que a umidade media na base úmida é de 34%. Isso significa e comprova os dados fornecidos pela empresa de 65% de teor de sólidos.

O teor de umidade tem influência direta no poder calorífico, pois quanto maior o teor de umidade, mais energia terá que ser gasta para evaporação da água. Quanto menor for o teor de umidade, maior será o poder calorífico medido. Outra propriedade que tem relação direta com o teor de umidade é o teor de sólidos, que

na empresa COCELPA é queimada na caldeira de recuperação com cerca de 62. Estes valores estão bem abaixo da média das demais indústrias que trabalham com uma faixa de 75% a 85% de teor de sólidos (Scucugli, 2008), o que provavelmente tem impacto direto na eficiência energética do licor negro. Um maior teor de sólidos no licor negro aumenta a eficiência da caldeira pois diminui a perda através dos gases expelidos na atmosfera e o calor requerido para evaporar da água do licor negro é menor.

5.3.3 Análise Química Imediata

Os resultados da composição química para desempenho do licor negro na queima estão registrados na TABELA 8.

TABELA 8 - RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA

Amostra	M. Voláteis %			Carbono Fixo %			Cinzas %		
	Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV
B1	48,88	1,08	2,21	14,81	1,83	12,39	36,32	1,5	4,13
B2	48,62	0,39	0,8	12,72	0,66	5,15	38,66	0,98	2,54
B4	52,86	5,09	9,64	20,39	1,74	8,55	26,75	3,63	13,58
B5	55,75	0,11	0,19	15,93	1,65	10,33	28,32	1,75	6,17
B6	51,04	0,5	0,98	14,69	0,49	3,35	34,27	0,97	2,83
B7	47,9	1,22	2,54	14,11	1,17	8,3	37,98	0,04	0
B8	48,96	0,44	0,89	16,75	2,47	14,76	34,3	2,58	7,52
B9	48,49	0,43	0,89	16,67	1,74	10,41	34,84	1,83	5,25
B10	46,95	0,87	1,86	17,41	4,98	28,61	35,63	5,66	15,89
MÉDIA	49,94	1,13		15,94	1,86		34,12	6,43	

O teor de cinzas avaliado se apresentou elevado, conforme o esperado, pois o licor negro apresenta cerca de 40% de inorgânicos. Altos teores de cinzas diminuem a eficiência do reator, já que necessita de um maior consumo de oxigênio. (HOFFMANN, 2010). Segundo o autor, da mesma maneira que a umidade, o teor de cinzas interfere no poder calorífico e causa perda de energia. A madeira de pinus tem cerca de 17% de carbono fixo, conforme os valores encontrados por Chaves (2013), próximos aos valores encontrados nas amostras de licor negro da COCELPA. O poder calorífico superior (PCS) do licor negro tem grande dependência com o teor de carbono presente (ROLF, 1993). É importante ressaltar que embora o

teor de carbono fixo seja semelhante na madeira de pinus, o teor de materiais que compõem a fração orgânica é menor e o teor de cinzas, que representa a fração inorgânica, é declaradamente mais elevado.

5.3.4 Poder calorífico

A TABELA 9 apresenta os resultados obtidos em relação ao poder calorífico superior.

TABELA 9 RESULTADOS OBTIDOS PARA O PODER CALORIFÍCO SUPERIOR DO LICOR NEGRO

AMOSTRA	PCS (Kcal/kg)	Desvio Padrão	Coef. Variação
1	3296	32	0,97
2	3289	18	0,54
3	3161	61	1,92
4	3279	62	1,88
5	3448	26	0,76
6	3196	52	1,64
7	3490	43	1,24
8	3401	74	2,16
9	3355	27	0,8
10	3324	77	2,32
MÉDIA	3323,9	47,2	

O poder calorífico superior do licor negro é bem menor do que o poder calorífico obtido de madeiras de pinus que se situa entre 4600-5000 kcal/kg (SILVA, 2001).

Quanto maior for o poder calorífico, maior é a quantidade de energia interna contida no licor. Antes de realizar as análises era esperado que o poder calorífico do licor fosse muito superior ao da madeira, pelo fato de ter grande percentual de lignina, ainda que esta esteja degradada pela ação do licor branco dentro do digestor.

A média do PCS das amostras de licor da COCELPA foi de 3323,9 Kcal/kg, abaixo dos valores médios encontrados na literatura de 4776 Kcal/kg (QUIRINO, 2004). Possivelmente estes baixos valores ocorram em função da constituição

química do licor, onde cada indústria trabalha com concentrações diferentes de licor branco, estas concentrações interferem na constituição do licor negro. Outro fator é a espécie usada para o processo de fabricação do papel, a COCELPA utiliza *Pinus taeda*, e o valor de 4776 Kcal/kg é para um licor que provém de um processo que utiliza madeira de eucalipto.

A TABELA 10 mostra os resultados do poder calorífico útil, que foi medido com as amostras úmidas.

TABELA 10 RESULTADOS OBTIDOS PARA O PODER CALORÍFICO INFERIOR NA BASE ÚMIDA DO LICOR NEGRO

AMOSTRA	PCI (Kcal/kg)	DESVIO PADRÃO	COEF. VARIAÇÃO
1	1648	66	4,03
2	1806	44	2,43
3	1733	90	5,18
4	1768	47	2,64
5	1810	37	2,07
6	1778	30	1,67
MÉDIA	1757,2	52,3	

Quando comparado os resultados do PCI com os resultados PCS do licor negro, o PCI apresentou valores menores, isso deve ao fato da quantidade de água contida nas amostras de licor cerca de 30%. Quanto mais lignina tiver uma madeira ou um licor negro em relação ao restante da fração orgânica, maior seu poder calorífico. O poder calorífico da lignina extraída da madeira é de 5700 a 6000 kcal/kg e das holoceluloses é de um pouco mais que 4500. Resultado disso, se o licor contiver mais lignina que carboidratos, ele teria, na sua fração orgânica, maior poder calorífico. (FOELKEL, 2012).

6 CONCLUSÕES

O licor negro é formado dentro do digestor no processo de polpação Kraft e queimado na caldeira de recuperação para cogeração de energia e para a recuperação do licor branco.

Do total de energia elétrica gerada pela COCELPA 18,5% desta é gerada a partir do processo de recuperação do licor, em contraste com a média nacional de 66,2%, demonstrando a ineficiência do processo da indústria em comparação com outras do mesmo setor. Porém, já existem indústrias que geram 100% de energia com este processo.

A possível redução da eficiência do processo de cogeração de energia pode ter origem no teor de sólidos do licor na entrada da fornalha (62-65% de sólidos totais), quando indústrias autossuficientes em energia elétrica têm operado com teores de sólido entre 75% a 85%.

Outra possível perda de eficiência seria na própria caldeira de recuperação, no sistema de transferência de calor, em função da obsolescência tecnológica da caldeira da empresa. As caldeiras mais novas já são projetadas para ter maior eficiência energética no processo.

O poder calorífico do licor negro apresentou um valor baixo comparado com o poder calorífico da madeira, provavelmente isso deve ao fato de que quase 40% da composição do licor ser matéria inorgânica que será recuperada posteriormente.

Sugestão para trabalhos futuros:

Um estudo mais aprofundado para um levantamento da influência das propriedades físicas no potencial energético do licor negro.

Há poucos dados na literatura sobre poder calorífico de licor negro e pouco estudo sobre o comportamento energético do licor negro de diferentes espécies em diferentes parques industriais. Um maior investimento em estudo nesta área, proporcionaria avanços tecnológicos.

7 REFERÊNCIAS

ANEEL – **Agência Nacional de Energia Elétrica. Biomassa**, 2005.
Disponível em: < [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>.
Acesso em: 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8633**:
Carvão vegetal – determinação do poder calorífico, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: Carvão
vegetal – Análise imediata. Outubro, 1986.

BARBOSA, C. M. L. **Análise e Predição da Geração de Vapor e Emissões Atmosféricas da Caldeira de Recuperação por Análise Multivariada**. 2004.128p.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola de Engenharia,
Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BRACELPA – Associação Brasileira dos Fabricantes de Celulose e Papel.
Estatísticas do setor 2012. São Paulo.
<http://www.bracelpa.org.br/bra/estatisticas/pdf/booklet/booklet.pdf> 2015

BRIANE, D.; DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation: la fabrication du charbon de bois**. Aix-en-Provence, ÉDISUD, 1985. 180p.

CARDOSO, M., OLIVEIRA, E.D., PASSOS, M.L.. Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills. Fuel 88 (2009) 756–763.

CARDOSO, M.. **Análise da unidade de recuperação do licor negro de eucalipto no processo “Kraft”, avaliando alternativas de processamento**. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1998. Tese (Doutorado).

CHAVES, A. M. B. VALE, A. T.; MELIDO; R. C. N; ZOCH, V. P. **características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de eucalyptus spp.** 2013 Disponível em <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2013b/CIENCIAS%20AGRARIAS/CARACTERISTICAS%20ENERGETICAS.pdf>

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras.** In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.

FERREIRA, E. T. F. **Análise de sistemas de cogeração com gaseificação de licor negro no setor de papel e celulose.** . Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) UEP, 2008.

FILHO, L. C.. SIMÕES, M. R.. WOLFF, F. **Propriedades Térmicas do Licor Negro de Processo Kraft.** CIADICYP (2000).

FOELKEL, C; artigo publicado em sua página. Disponível em <http://www.celso-foelkel.com.br/celso2.html> 2015.

FREDERICK, J., **Black liquor properties.** Citado por ADAMS T.N.. **Kraft recovery Boilers**,. Tappi press: Atlanta,GA,1997:61-99.

FREDERICK, W.J. **"Kraft Recovery Boilers – Chapter 3: Black Liquor Properties"**, edited by Adams T.N., TAPPI Press (1997).

FRICKE, A. L. **Physical Properties of Kraft Black Liquor:** University of Florida: Gainesville, FL, and University of Maine: Orono, ME, 1987. Em SIXTA H. Handbook of Pulp Vol. 1. WILEY-VCH Verlag GmbH &Co. KGaA, Weinheim, 2006.

FUTUTENG disponível em <http://www.futureng.pt/coeficiente-de-condutibilidade-termica>

GUIMARÃES, M. A., ., **Novo método para determinação da quantidade de recirculação de cinzas nas caldeiras de recuperação..** Universidade Federal de Viçosa 2013

HERMANS, M. A., GRACE, T. M.. **The effect of Oxidation on Black Liquor Composition and properties of Kraft Black Liquors.** Em ZAMAN A.A., TAVARES S.A., FRICKE A.L., Studies on the Heat Capacity of Slash Pine Kraft Black liquors: Effects of Temperature and Solids Concentrations. American Chemical Society. 1996.

HOFFMAN, B. S. **O Ciclo combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO₂: Uma Solução para Mitigar as Emissões de CO₂ em Termelétricas a Carvão em Larga Escala no Curto Prazo.** Dissertação (mestrado em ciências). Universidade Federal, Rio de Janeiro, 2010.

HUPA, M., - **Recovery Boiler Chemical Principles, Kraft Recovery Boiles,** Capítulo 2, Tappi Press, Atlanta, Georgia, USA, 1997

JARA, E.R.P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797)

KLOCK, U., MUÑIZ, G. I. B., HERNANDEZ, J. A., ANDRADE, A. S.. **Química da Madeira**, 3ª ed. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005.

MARINS, G.. **Caracterização do licor negro de eucalipto para a avaliação do potencial de incrustações de evaporadores.** Dissertação (mestrado em engenharia química) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. Campinas, 2012.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional (BEN).** Brasília: Ministério das Minas e Energia (MME). Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site>. 2014.

QUIRINI, W. F. **Poder calorífico da madeira ligno-celulósicos**. Publicado na Revista da Madeira, nº89, p.100-106, abril 2005.

RAMAMURTHY P., HEININGEN A.R.P.V., KUBES G.J.. **Viscosity and thermal conductivity of black liquor**. Tappi journal, Vol. 76, No.11. 1993

ROBERT G. & THOMAS G.. **A method for calculating the composition and heating value of black liquors from kraft and polysulfide liquors**. Tappi Journal de Junho de 1984.

ROLF, R – **Black Liquor, an Impossible Fuel** – Tappi Engineering Conference, 1993

SCUCUGLIA, F. **Aumentando a geração de energia com o conceito High Power** concept's recovery boiler. Artigo publicado na revista O Papel, 2008 pg 82-94.

SILVA, D. A. **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis e compensados**. Dissertação dourado em engenharia florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SILVA, F. A. RESTREPO, A. RODRIGUES, L. A. GEDRAITE, R. **Aumentando a geração de energia com o conceito High Power em caldeiras de recuperação**. O Papel, São Paulo, SP, ano LXIX, n. 12, p. 86-94, dez. 2008.

SIXTA H. **Handbook of Pulp Vol. 1**. WILEY-VCH Verlag GmbH &Co. KGaA, Weinheim, 2006.

SMALL, J. D., FRICKE, A. L.. **Thermal Stability of Kraft Black Liquor Viscosity at Elevated Temperatures**. American Chemical Society, 1985.

SODERHJELM, L.; HAUSALO, T. **Extensive analysis of strong black liquor**, Appita. 1996.

STEFANOV Z., HOO K. A. **A Distrubuted Model of Black Liquor Falling Film Evaporators**. Part I. Modeling of a Single Plate. American Chemical Society 2003.

THOMPSON, R. , ULOTH, V. , WONG, P. **Black liquor characterization – initial studies**. Internacional chemical recovery conference, 2007.

TORNIAINEN, J. **Chemical and physical analysis of black liquors**. Internacional chemical recovery conference, 2007.